

CAD/CAE集成技术在水利工程中的应用综述

陈帅*, 李武斌, 李诚

西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年7月16日; 录用日期: 2023年8月6日; 发布日期: 2023年8月16日

摘要

CAD (计算机辅助设计)和CAE (计算机辅助工程)是现代工程设计和分析的重要工具。CAD可以用于设计和绘制工程结构和部件, 而CAE可以用于分析和验证这些结构和部件的性能和安全性。CAD/CAE一体化是将这两种工具通过桥梁软件集成到同一个软件平台中, 以便工程师可以更有效地进行设计和分析。CAD/CAE一体化技术在水利工程设计中具有重要的意义, 它能够提高水利工程设计的效率和质量, 并为水利工程领域的发展带来新的机遇。本文介绍了CAD/CAE一体化技术在水利工程设计中的应用, 探讨其在水利工程设计中的优势, 分析了CAD/CAE一体化技术的优势和局限性, 以及它如何改善水利工程设计, 最后介绍了它在水利工程设计中的发展前景, 指出其未来发展趋势, 以帮助水利工程技术人员更好地利用此技术。

关键词

CAD/CAE集成技术, 水利工程, 设计, 应用

Overview of the Application of CAD/CAE Integration Technology in Hydraulic Engineering

Shuai Chen*, Wubin Li, Cheng Li

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 16th, 2023; accepted: Aug. 6th, 2023; published: Aug. 16th, 2023

Abstract

CAD (Computer Aided Design) and CAE (Computer Aided Engineering) are important tools for

*通讯作者。

文章引用: 陈帅, 李武斌, 李诚. CAD/CAE 集成技术在水利工程中的应用综述[J]. 土木工程, 2023, 12(8): 1067-1073.

DOI: 10.12677/hjce.2023.128122

modern engineering design and analysis. CAD can be used to design and draw engineering structures and components, while CAE can be used to analyze and verify the performance and safety of these structures and components. CAD/CAE integration is to integrate these two tools into the same software platform so that engineers can design and analyze more effectively. CAD/CAE integration technology is of great significance in hydraulic engineering design. It can improve the efficiency and quality of hydraulic engineering design and bring new opportunities for the development of the hydraulic engineering field. This paper introduces the application of CAD/CAE integration technology in hydraulic engineering design, discusses its advantages in hydraulic engineering design, analyzes the advantages and limitations of CAD/CAE integration technology, and how to improve hydraulic engineering design. Finally, its development prospect in hydraulic engineering design is introduced, and its future development trend is pointed out to help hydraulic engineering technicians make better use of this technology.

Keywords

CAD/CAE Integration Technology, Hydraulic Engineering, Design, Application

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水利工程是指利用水资源,防治水灾、抗旱、节水、供水、水电、航运、治理水土流失等一系列工程,是指对水资源进行综合利用和管理的一门工程学科,其涉及到水库、堤防、渠道、泵站、水坝等多个方面。CAD (计算机辅助设计)和 CAE (计算机辅助工程)是现代工程设计和分析的重要工具[1]。CAD 可以用于设计和绘制工程结构和部件,而 CAE 可以用于分析和验证这些结构和部件的性能和安全性。CAD/CAE 一体化是将这两种工具通过某种桥梁软件集成到同一个软件平台中,以便工程师可以更有效地进行设计和分析[2]。

在水利工程设计和分析中,计算机技术的应用已经成为不可或缺的工具。其中,CAD 和 CAE 技术是最为常用的工具之一。CAD 技术可以用于设计和绘制水利工程的各种结构和部件,而 CAE 技术则可以用于分析和验证这些结构和部件的性能和安全性[3] [4]。随着计算机技术的不断发展,CAD/CAE 一体化技术已成为水利工程设计和分析的主要工具之一。本文旨在通过综述 CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的应用,为水利工程设计和可靠性分析方法提供思路,并对 CAD/CAE 一体化技术的发展进行展望。

2. CAD/CAE 一体化技术的国内外研究现状

近年来,随着计算机技术的发展,计算机技术逐渐运用到工业设计与生产的行业中,其中多款主流 CAD 和 CAE 软件的发展对现代化工业设计与生产效率的提高起到了重要作用。

世界上第一个真正意义上的 CAD 软件是在上世纪 60 年代美国的麻省理工学院(MIT)开发的,名为“Sketchpad”。它是一个创纪元的软件,通过该软件,设计者们可以在电脑上以绘图的方式与计算机进行交互,这是 CAD 发展的开端。到 1970 年后,CAD 之父——Patrick J. Hanratty 设计了 ADAM 的 CAD 系统。ADAM 系统通用性强大并能够跨平台进行操作,甚至到目前为止 80% 以上的 CAD 软件都与 ADAM 相关联。后来 CAD 软件逐渐从科技研究转向商业用途,大多数 CAD 软件还是由大型汽车和航空航天制造企业的内部团队开发,并且通常与大学研究团队合作。在此期间,像民用汽车制造商甚至航空航天制

造商都有大型的内部 CAD 软件开发团队,并致力于专用 CAD 程序的开发。CAD 软件不仅可以替代传统的手工绘图,还可以减少绘图错误,提高设计效率,缩短设计周期。

CAE (计算机辅助工程)作为有限元分析的重要分支,是一种近似数值分析方法,其本质是对复杂的连续整体进行离散化分析,通过简化求得近似解。CAE 软件仿真过程包括前处理、求解、后处理、优化和报告。首个有限元分析软件是美国计算机科学协会,为帮助美国航天局解决设计过程中遇到复杂结构力学仿真分析而设计的 NASTRAN 软件。随后,ANSYS、ABAQUS 等有限元分析软件得到了发展。随着计算机技术的发展,CAE 技术越发成熟,不仅局限于军事航空领域,而且商业用途也越来越广泛。现在 CAE 技术已经成为工程项目和产品设计开发的不可或缺的一部分。

由于 CAD 和 CAE 的工作重点不同,因此,最初 CAD 与 CAE 系统往往各自独立,但在实际工作中由于两种软件的操作人员无法进行有效沟通,项目开展过程中经常出现分析错误、重复建模等问题。在此背景下,CAD/CAE 一体化技术应运而生。美国的飞行器设计方首先提出了 CAD/CAE 集成。事实上,CAD/CAE 集成确实能有效消除设计、分析建模工作的孤立现状,并实现设计、分析数据信息的共享,达到提高工程效率的目的[5]。在 CAD 精准建模的基础上,CAE 技术的应用使许多过去受条件限制无法分析的复杂问题,可通过计算机数值计算得到满意的结果;另一方面,计算机辅助分析使繁杂的工程分析问题简单化,使复杂的过程层次化,节省了大量时间[6]。在产品的设计、分析等方面发挥了重要作用,同时 CAE/CAE 这一技术在国内外得到了迅猛发展,进而又推动了许多相关基础学科和应用科学的发展。尽管 CAD 和 CAE 系统在产品开发过程中都发挥重要作用,但它们之间存在相互独立的特点导致了所谓的“自动化孤岛”现象,在产品开发过程中造成了信息交换不畅的问题,严重影响了整体设计效率,尤其是在需要频繁修改设计时[7]。

大连理工大学刘月[8]选用 CATIA 作为 CAD 软件及,选用 ANSYS 软件作为 CAE 软件,在 CATIA 软件上创建重力坝参数化模型后通过 CATIA-ANSYS 接口导入 ANSYS 进行稳定性分析,根据模拟的结果对设计方案进行调整,开发出一套基于 BIM 技术的 CAD/CAE 一体化的重力坝参数化设计方法。乔世范等[9]利用 Catia 强大的三维地质体建模功能进行三维地质建模,再利用其有限元模块对地质体进行网格划分;基于对两类软件中单元、节点数据关系的差异分析,应用 Visual-Basic 语言编写 Catia-Flac3d 接口程序,实现了将 CATIA 环境下建模生成的单元、节点信息导入 Flac3D。降低了 Flac3D 前处理建模的难度,实现复杂了工程的 Flac3D 三维模型快速和准确构建,弥补了 CATIA 在有限元计算方面的不足,一定程度上实现了 CAD/CAE 技术的集成。彭成佳等[10]以抛物线拱坝为对象,首先对 CATIA 进行了相关二次开发,借助 VB 和 CATIA Automation 对象访问等方法实现了基于拱梁分载法的拱坝体形调整和参数化三维建模,并对三维设计与有限元计算的无缝结合进行了初探。华北理工大学的张瑞[11] 1) 通过 IFC 标准格式的中间文件进行模型转化,先将 BIM 模型以 IFC 格式输出,再将 IFC 模型导入到结构分析软件生成有限元分析模型; 2) 直接提取 BIM 模型的几何信息和物理信息,将提取的信息整理成有限元建模的语言格式,进而生成有限元模型,两种方法将拱坝 BIM 模型与有限元分析软件 ANSYS 相结合进行拱坝的静力学分析来确定拱坝静荷载作用下是否安全,实现了水工建筑物设计阶段的设计优化。任浩楠,王晓东[12]选择 CATIA 作为 CAD 系统进行建模,选择 ANSYS 作为 CAE 系统进行可靠性分析,用 CAPRICA Gateway 接口软件来解决 CATIA 和 ANSYS 之间数据双向传递问题,实现了在 CATIA 和 ANSYS Workbench 之间搭建水工结构 CAD/CAE 一体化系统的方法。王文进[13]等利用 VB 语言的函数实现与 CATIA 二次开发接口的对接、自制可使 CATIA 自动建模和出图的程序,把 CATIA 自动剖分的网格单元节点信息转化为 ANSYS 可读格式文件,基于 APDL 语言,建立起 CATIA 与 ANSYS 之间的数据转换,并运用该技术对重力坝实例进行了设计与分析,应用本程序所得结果与理论值一致,从而实现了 CAD/CAE 的集成。针对目前存在的 CAD/CAE 数据转换精度损失和重复建模的问题,利用 ANSYS

Workbench 平台开发面向真空发生器的全流程 CAD/CAE 系统, 建立结构设计和仿真分析相关联的参数化模型, 降低了模型的精度损失, 避免了三维模型优化变更造成的重复建模问题。胡小雄等[14]针对目前存在的 CAD/CAE 数据转换精度损失和重复建模的问题, 利用 ANSYS Workbench 平台开发面向真空发生器的全流程 CAD/CAE 系统, 建立结构设计和仿真分析相关联的参数化模型, 降低了模型的精度损失, 避免了三维模型优化变更造成的重复建模问题。

为了主动寻求工程问题的优化解决方案, 必须对 CAD/CAE 平台进行集成, 以便充分利用优化平台来驱动 CAD 和 CAE 模型进行反复修改计算, 以寻找最佳解决方案。实现 CAD 与 CAE 系统之间的集成的一个关键方面是建立一个共享的产品数据模型, 它是 CAD 和 CAE 系统进行信息集成的基础。在产品开发过程中, CAD 和 CAE 系统被广泛用于辅助设计人员完成产品设计和性能分析的任务。通过将 CAD 和 CAE 辅助工具集成在一起, 构建一个集成的产品设计平台, 可以缩短产品开发周期, 并提高产品设计质量。

3. CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的应用

3.1. CAD/CAE 一体化技术在水利工程应用中的优势

水利工程的设计和优化分析是工程建设过程中非常重要的环节, 其设计效率和设计质量直接影响工程的投资效益和安全稳定。传统的设计和优化分析方式需要依赖手工绘图、经验判断和试错等方法, 效率低下、质量难以保证。随着计算机技术的不断发展和普及, CAD 和 CAE 技术被广泛应用于水利工程领域。CAD/CAE 一体化技术具有许多优势: 1) 设计效率的提高。CAD/CAE 一体化技术能够实现产品的设计和分析, 使设计和分析的过程更加融合, 从而提高设计效率[15]; 2) 设计准确性的提高。CAD/CAE 一体化技术能够快速确定设计模型的位置, 并能够快速确定设计模型的参数, 使设计准确性得到极大提高[16]; 3) 节约时间和成本。CAD/CAE 一体化技术能够更有效地完成设计和分析, 从而节省时间和成本, 更好地满足客户的要求[17]; 4) 提高工程的安全性和稳定性。在 CAD 精准建模的基础上, CAE 技术可以帮助设计人员进行工程结构的分析和优化从而大大提高工程的安全性和稳定性[18]。CAD/CAE 一体化技术是将 CAD 和 CAE 有机结合起来, 通过集成化、协同化和自动化等手段, 为设计人员提供全方位的设计支持和优化分析[19]。综上, CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的应用可以提高设计效率、降低成本、提高工程质量和安全性。随着计算机技术的发展, CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的应用前景必然更加广阔。

3.2. CAD/CAE 技术在水利工程中的应用

在水利工程中, CAD/CAE 一体化的应用非常广泛。以下是一些常见的应用领域:

1) 水坝设计和分析。水坝是水利工程中最重要的构筑物之一。传统的水坝设计方法往往需要进行复杂的计算和分析, 效率较低。CAD/CAE 一体化软件可以用于设计和分析各种类型的水坝, 包括重力坝、拱坝和土石坝等。采用 CAD/CAE 一体化技术可以实现水坝的三维模型设计和模拟分析, 从而提高设计效率和准确性[20]。我国采用 CAD/CAE 技术设计和分析的坝有很多, 其中比较著名的有三峡工程。三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程, 采用了大量的 CAD/CAE 技术进行设计和分析。在设计阶段, 三峡工程采用了先进的 CAD 软件进行坝体的三维建模和结构设计, 同时采用了 CAE 软件对坝体进行了复杂的受力分析和稳定性计算。在施工阶段, 三峡工程还采用了 CAD 软件进行施工图的绘制和优化, 以确保施工的精度和质量。在运维阶段, 三峡工程还采用了 CAD/CAE 技术进行坝体的巡检和维护计划的制定, 以及坝体的健康监测和预警。可以说, 三峡工程的成功建设和长期稳定运行, 离不开 CAD/CAE 技术的支持。除此之外, 我国的其他大型水利工程, 如黄河三门峡工程、长江小浪底水电站等, 也都采用了

CAD/CAE 技术进行设计和分析。多个实例证明,用 CAD/CAE 一体化技术进行设计,通过对水坝的结构、稳定性、渗透等多方面进行分析,可以确保水坝的安全性和可靠性。

2) 水力发电站的设计和分析。CAD/CAE 一体化软件可以用于设计和分析水力发电站的各个组成部分,包括水轮机、发电机和水道等。工程师可以使用 CAD 工具设计这些组成部分的结构,然后使用 CAE 工具进行流场分析、压力分析和动力学分析等[21]。

3) 水文模拟和水资源管理。CAD/CAE 一体化软件可以用于模拟水文过程和管理水资源。工程师可以使用 CAD 工具绘制水文图,然后使用 CAE 工具进行水文模拟和预测。这些工具还可以用于优化水资源的分配和管理。

4) 水质分析模拟和污水处理。CAD/CAE 一体化软件可以用于模拟水质分析过程和处理污水。工程师可以使用 CAD 工具设计污水处理设施的结构和部件,然后使用 CAE 工具进行水质分析和处理模拟。这些工具还可以用于优化污水处理过程,以提高处理效率和降低成本。

5) 水闸设计。水闸是调节水流量和水位的一种重要设施。传统的水闸设计方法需要进行大量的计算和试验,效率较低。采用 CAD/CAE 一体化技术可以实现水闸的数字化设计和模拟分析,从而提高设计效率和准确性。葛洲坝水利枢纽是中国最大的水利工程之一,采用了大量的 CAD/CAE 技术进行设计和分析。在设计阶段,葛洲坝水利枢纽采用了 CAD 软件进行水闸的三维建模和结构设计,同时采用了 CAE 软件对水闸进行了复杂的受力分析和稳定性计算。在施工阶段,葛洲坝水利枢纽还采用了 CAD 软件进行施工图的绘制和优化,以确保施工的精度和质量。在运维阶段,葛洲坝水利枢纽还采用了 CAD/CAE 技术进行水闸的巡检和维护计划的制定,以及水闸的健康监测和预警。

6) 水利渠道设计。水利渠道是输水的一种重要设施。传统的水利渠道设计方法需要进行大量的计算和试验,效率较低。采用 CAD/CAE 一体化技术可以实现水利渠道的数字化设计和模拟分析,从而提高设计效率和准确性[22]。在黄河水利渠道的设计阶段,使用 CAD 软件进行三维建模和结构设计,包括渠道的主体结构、水头、分支、闸门等。接着,使用 CAE 软件对渠道进行受力分析和稳定性计算,计算出渠道在不同水流、水位、水头等条件下的水压力、水流速度等情况。在黄河水利渠道的运维阶段,采用 CAD/CAE 技术进行渠道的巡检和维护计划的制定,以及渠道的健康监测和预警。通过 CAD/CAE 技术的支持,可以及时发现和解决渠道的问题,确保了黄河渠道的长期稳定运行。

CAD/CAE 集成技术在水利工程中的应用非常广泛,可以提高设计和分析效率,减少错误和重复工作,并促进更好的工程决策。

4. CAD/CAE 集成技术的局限性

尽管 CAD/CAE 一体化软件在水利工程中应用广泛,具有较大优势,然而, CAD/CAE 集成技术也存在一些局限性,主要包括以下几个方面:

1) CAD 与 CAE 系统往往各自独立运行。目前常使用的设计方式是由设计人员在 CAD 软件中建模,由设计分析人员通过 CAE 软件的数据结构将模型导入,并划分网格、施加边界、荷载进行初步试算。若计算结果不满足经济效益或者安全要求,就要求设计人员重新返回 CAD 软件对模型进行修改,把修改后的工程实体模型交给 CAE 分析人员重新计算。这种工作方式效率低下,可用性不高,且数据在 CAD/CAE 系统中只能单向传递[23]。

2) 建模复杂,水利工程模型通常比较复杂,需要考虑多种因素,如水文、水力和结构等。这些因素的相互影响会导致模型建立更加复杂。

3) 水利工程模型的计算量通常较大,需要大量的计算资源支持,但由于计算资源的限制,一些小型或者中小型企业可能无法承受较大的计算资源的投入。

4) CAD/CAE 一体化技术需要大量的人力和物力投入,这对企业的管理和维护提出了更高的要求,特别是在长期的使用和更新过程中,这就需要不断地对技术和软件进行维护和更新。

5) CAD/CAE 一体化技术在水利工程上的推广和普及受到了一定的限制,这可能与技术成熟度、市场认可度和技术标准等因素有关。

6) CAD/CAE 一体化技术对软件开发公司具有较强的依赖性,其受制于软件公司的技术支持和版本更新,这就需要频繁更新硬件系统才能保持最新的技术水平,同时成本也会增大。

7) CAD/CAE 一体化技术对操作者的要求较高,需要从业者具备良好的计算机专业知识,而具备这些技能的人才不足[24]。

尽管, CAD/CAE 一体化技术存在诸多局限性,但是这并不否认 CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的应用价值。在实际应用该技术时,需要针对具体问题和实际情况进行综合判断分析并提出相应解决方案。

5. CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的发展方向

CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的应用前景广阔。随着计算机技术的发展, CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的应用将不断扩展和深化。本节将探讨 CAD/CAE 一体化技术在水利工程中的未来发展方向。

1) 智能化设计

随着人工智能的不断发展, CAD/CAE 一体化技术在水利工程中将逐渐实现智能化。通过将人工智能应用于 CAD/CAE 一体化技术中,可以实现设计过程的自动化、智能化和高效化,从而提高设计效率和准确性[25]。

2) 虚拟现实技术

随着虚拟现实技术的不断发展, CAD/CAE 一体化技术在水利工程中将逐渐实现虚拟现实技术的应用。通过将虚拟现实技术应用于 CAD/CAE 一体化技术中,可以实现设计过程的可视化、交互化和真实化,从而提高设计效率和准确性。

3) 建立水利工程 CAD/CAE 系统

要建立一套完整的 CAD/CAE 系统,可以实现水利工程从图纸设计到工程施工的全过程计算和分析,以提高水利工程的设计质量[26]。

4) 建立水利工程数据库

建立一个完整的水利工程数据库,可以收集各种水利工程数据,为水利工程设计、模拟分析和智能化设计提供依据,提高水利工程设计质量。

6. 结论

水利工程是国民经济建设中的重要组成部分,水利工程设计 and 施工的质量将直接影响其安全和经济效益。因此,如何科学和高效的进行水利工程的设计和施工,是摆在水利行业工作者面前的重大课题[27]。

本文论述了 CAD/CAE 一体化技术在水利工程设计中的应用,介绍了其在水利工程设计中的优势,探讨了其在水利工程设计中的应用,最后论述了它在水利工程设计中的发展前景。本文的研究结果表明, CAD/CAE 一体化技术在水利工程中具有重要意义,它能够提高水利工程设计效率和质量,并为水利工程领域的发展带来新的机遇。随着科学技术的不断发展, CAD/CAE 一体化技术在水利工程行业的应用将会有更加广阔的前景。未来, CAD/CAE 一体化技术将会成为水利工程行业不可或缺的重要工具,它将为水利工程行业提供更多的设计思路和方法,从而有效的提高水利工程行业的工作效率和水平,从而最大

程度促进我国工业现代化的发展。

参考文献

- [1] 孙志远, 刘蕴博, 籍龙慧, 王浩琳. 铝合金副车架的轻量化结构设计与试验验证[J]. 汽车零部件, 2022(10): 11-16.
- [2] 黄志高. 基于知识的塑料注射模集成设计系统研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [3] 张立涛, 丁华, 王义亮. 采煤机零件参数化 CAD/CAE 设计与分析系统[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 239-241.
- [4] 徐曙光. 浅议信息技术及新型科技在水利工程设计中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(9): 232-233+236.
- [5] 于琦. 基于参数驱动的重力坝 BIM 在线设计技术研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2020.
- [6] 唐建国. 面向可信分析的 CAD 模型简化误差评价[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [7] 吴强, 刘夫云, 胡汝凯, 余汉红. 基于 CAD/CAE 集成的机械零件性能优化方法研究[J]. 机械强度, 2021, 43(6): 1504-1509.
- [8] 刘月. 基于 BIM 的重力坝参数化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
<https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2020.001558>
- [9] 乔世范, 谢济仁, 郭麒麟, 许文龙. CATIA-FLAC^{3D}耦合建模方法及其应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(4): 63-68.
- [10] 彭成佳, 李希龙, 彭松涛, 郝鹏, 苏鹏. 拱坝三维设计及其与有限元技术结合初探[J]. 贵州水力发电, 2010, 24(4): 23-27.
- [11] 张瑞. 基于 BIM 技术的拱坝有限元静力学分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [12] 任浩楠, 王晓东. 基于 CATIA 和 ANSYS Workbench 的水工结构 CAD/CAE 一体化系统[J]. 水利规划与设计, 2018(2): 92-94.
- [13] 王文进, 朱亮亮, 赵钦, 等. 重力坝参数化设计系统开发[J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 56-62.
<https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2018.02.009>
- [14] 胡小雄, 郑雨轩, 汪达军, 刘文, 叶鑫宇, 章苗英, 高殿荣, 王春鹤. 真空发生器的全流程 CAD/CAE 系统开发与应用[J]. 液压与气动, 2022, 46(6): 25-32.
- [15] 张伟. 糊底机关键部件的优化设计及模态分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [16] 汤俊, 闫仕军, 卢冠宇. 基于 NX 二次开发的铝车轮 CAD/CAE 集成系统的开发与应用[J]. 汽车文摘, 2021(8): 47-51.
- [17] 吴彦骏, 赵震, 刘川林, 等. 热收口智能优化设计系统中的 CAD/CAE 集成技术研究[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(4): 49-53.
- [18] 张龙, 马亚龙. 基于 Solidworks 的连退清洗段转向辊优化设计[J]. 河北冶金, 2022(10): 54-57+62.
- [19] 毛兴宽. 机械设计与模具设计中 CAD/CAE 技术的应用[J]. 内燃机与配件, 2020(8): 227-228.
- [20] 撒文奇. 基于三维设计方法的重力坝 CAD/CAE 集成设计平台研究与开发[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2010.
- [21] 梅立. 拉西瓦水电站计算机监控系统设计研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [22] 李超. 水利工程渠道防渗施工技术分析[J]. 现代农村科技, 2022(3): 55-56.
- [23] 吴强, 刘夫云, 余汉红, 胡汝凯. 一种基于 Txt 和 Excel 中心数据库的 CAD/CAE 集成方法[J]. 机械设计与制造, 2023(2): 211-214.
- [24] 李春秀. 故障物理及可靠性物理技术的应用研究[J]. 中国高新科技, 2019(18): 50-51.
- [25] 孙庆伟, 熊先青, 彭淑勤, 单润后. 板式家具智能制造的工艺变型设计方法[J]. 林业工程学报, 2022, 7(6): 187-195.
- [26] 冶运涛, 蒋云钟, 寇怀忠, 顾晶晶, 董甲平, 黄建雄, 关昊哲. 数字孪生流域的基础模型、演化路径与评判准则[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 27-38+46.
- [27] 赵洪丽, 马吉刚, 郭江. 山东省调水工程智慧运维的转型升级思路[J]. 水利水电技术, 2020, 51(S1): 227-230.